Servicio Meteorológico Nacional

BOLETIN 1 – TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2021

Gerardo Carbajal Benítez[1], Héctor Ochoa[2,3], María Elena Barlasina[1], Eduardo Luccini[4,5], Facundo Orte[6], Elian Wolfram[1,6] y Héctor Estévez Pérez[7].

1. Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.
2. Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino.
3. Universidad Tecnológica Nacional FRBA. Argentina.
4. CONICET - Centro de Excelencia en Productos y Procesos de Córdoba, Argentina.
5. Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina.
6. CEILAP, UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Argentina.
7. Instituto de Geofísica, UNAM, México.

Septiembre, 2021

Ministerio de Defensa
Presidencia de la Nación

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

INDICE

RESUMEN 4

ANTECEDENTES 5

1. Introducción. 6
2. CONDICIONES METEOROLOGICAS PREVALECIENTES 7
   2.1 Temperaturas. 7
   2.2 Área y volumen las NEP 7
   2.3 Estabilidad del vórtice. 9

3. OBSERVACIONES DE OZONO 10
   3.1 Observaciones Satelitales. 10
   3.2 Estaciones en superficie. 11
      3.2.1 Estación VAG USHUAIA. 12
      3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO. 13
      3.2.3 Estación Antártica San Martin 14
      3.2.4 Estación Antártica Belgrano II 14

4. ACTIVACION QUIMICA DEL VÓRTICE 15
   4.1 Resultados de Modelo BASCOE. 15

5. EL AGUJERO DE OZONO 17
   5.1 El área del agujero de ozono. 17

6. CONCLUSIONES 18
7. AGRADECIMIENTOS 18
8. BIBLIOGRAFÍA 19

RESUMEN.

El presente Boletín 1, tiene por objetivo, establecer la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida 2021. La temperatura de la estratosfera mínima y zonal, se encuentran por debajo de los valores mínimos históricos del periodo 1979 al 2020, pero por arriba del percentil del 10% y las proyecciones muestran que así permanecerá por lo menos los próximos 5 días. El flujo de calor, a través del movimiento de ondas atmosféricas, fue muy poco, aunque los últimos días ya se nota una actividad muy cercana a la normal. Las Nubes Estratosféricas Polares estarán presentes, y por arriba de la media histórica, pero no llegan a las áreas máximas, la destrucción de ozono ya se encuentra presente debido a la liberación poco a poco de las sustancias agotadoras de ozono, como el óxido de cloro (ClO). El área Agujero de Ozono, hasta el 4 de septiembre es de 19,6 millones de km^2, por encima de su media hasta ese día que es 14,8 millones de km^2, una analogía que se puede decir es que actualmente el agujero de ozono ya cubriría la totalidad del país más grande del mundo que es Rusia, con 17,1 millones km^2. Aún es muy temprano para establecer la tendencia y desarrollo del agujero de ozono hasta el final de la temporada.

Palabras Claves: Ozono, Estratosfera, Antártida, Destrucción, Química y Meteorología-

ABSTRACT.

The objective of the 1th Bulletin is to establish the evolution of the Ozone Hole over Antarctica in 2021. The minimum, and zonal stratosphere temperatures is more below, than the historical minimum values for the period 1979 to 2020, but above the 10% percentile, and the projections show that it will remain that way for at least the next 5 days. The flow of heat, through the movement of atmospheric waves, was very little, although in recent days an activity very close to normal has already been noted. The Polar Stratospheric Clouds will be present, and above the mean of period 1979 to 2020, but they do not reach the maximum areas, the destruction of ozone is already present due to the present release of ozone depleting substances, such as chlorine oxide (ClO). The Ozone Hole area, until September 4, is 19.6 million km^2, above its average until that day, which is 14.8 million km^2, if we establish an analogy, it can be said that, is that currently the hole of ozone, would already cover the entirety of the largest country in the world which is Russia, with 17.1 million km^2. It is still too early to establish the trend and development of the ozone hole until the end of the season.

Key Words: Ozone, Stratosphere, Antarctica, Destruction, Chemistry y Meteorology

ANTECEDENTES.

El descubrimiento de un agujero de la capa de ozono durante la primavera en la Antártida a mediados de la década de 1980, reveló la amenaza que representan las sustancias que agotan la capa de ozono producidas por el hombre. El daño causado por estos compuestos expone a las personas y los ecosistemas de la Tierra a la dañina radiación ultravioleta. Dentro de los 10 artículos más relevantes de la revista **nature**, se encuentra "El Descubrimiento del Agujero de Ozono en la Antártida" que cambio la perspectiva de las ciencias de la atmósfera y arrojo una de las políticas ambientales más exitosas de la historia, a nivel mundial, como lo es **el Protocolo de Montreal**. En 1985 Joe Farman, Brian Gardiner y Jonathan Shanklin reportan con 20 años de datos de ozono total de las Estaciones Antárticas Haley y Faraday, que los niveles de ozono comenzaron a descender (Agujero de Ozono) en los meses de primavera austral hacia fines de la década de 1970. Ellos sugieren y atribuyen a que esa disminución de ozono se debe a compuestos de origen antropogénico llamados Clorofluorocarbones (CFC's) los cuales provienen del uso de aerosoles y accesorios para refrigerar. En 1974 sugieren que el monóxido de cloro (ClO) se produce a partir de los CFC's y por lo tanto son destructores de ozono. A principios de la década de 1980, las mejores proyecciones de los modelos estratosféricos indicaron que, la producción continua de CFC's en grandes cantidades, pone en riesgo la destrucción de entre el 2% y el 4% de la capa de ozono para fines del siglo XX. Pero aún no se sugiere que el ozono en latitudes polares fuera especialmente sensible. El agujero de ozono planteaba situaciones como el incremento de cáncer de piel, debido al aumento de la radiación ultravioleta y algunos otros daños en la ecología. Por lo tanto, los encargados de la formulación de políticas internacionales concluyeron que se necesitaba una estrategia cautelosa de protección del ozono y en marzo de 1985, se firmó la **Convención de Viena de las Naciones Unidas para la Protección de la Capa de Ozono**. Donde se pidió más investigación sobre la capa de ozono, pero no contenía objetivos legalmente vinculantes para la reducción de CFC5. El informe de Farman y sus colegas sobre la pérdida de un tercio de la capa de ozono primaveral sobre la Antártida se publicó unos meses después. La respuesta de los formuladores de políticas fue inicialmente bien recibida. Sin embargo, argumentaron que los principios de precaución eran parte de la convención y firmaron **el Protocolo de Montreal de 1987** sobre sustancias que agotan la capa de ozono. Este fue un acuerdo para detener el crecimiento de la producción y el consumo de sustancias que agotan la capa de ozono a las tasas vigentes en ese momento, y cumplir con el tiempo para considerar si disminuir la producción. Posteriormente se ratificó notablemente rápida en 1989 y a enmiendas posteriores (comenzando con **la Enmienda de Londres en 1990**) que incluyeron restricciones cada vez más estrictas sobre la producción y el consumo mundial de sustancias que agotan la capa de ozono. El Protocolo de Montreal condujo a la eliminación mundial de la producción y el consumo de CFC's para 2010, y ahora el agujero de ozono antártico se está recuperando paulatinamente. Por tanto, el protocolo evitó que la capa de ozono colapsara y es una historia de éxito emblemática para la política medioambiental mundial. Debido a que los CFC's tienen una vida útil atmosférica de 50 años o más, la atmósfera no se recuperará por completo hasta después de 2050, incluso en ausencia de más emisiones (Solomon, 2017).

DÍA MUNDIAL DE
LA CAPA DE OZONO
PROTOCOLO DE MONTREAL
PARA MANTENERNOS FRESCOS A NOSOTROS,
A NUESTROS ALIMENTOS Y VACUNAS
16 DE SEPTIEMBRE DE 2021
ONU
programa para el
medio ambiente
secretaría
de ozono
Convenio de Viena
PROTOCOLO DE MONTREAL

1. INTRODUCCIÓN

Un efecto relacionado e inesperado, se reveló a principios de la década de 2000, cuando los estudios mostraron que el agujero de ozono antártico ha afectado la circulación atmosférica en la superficie en el hemisferio sur, siendo notable el corrimiento de la corriente en chorro hacia el polo. Sin embargo, las observaciones y el modelado computacional confirman que la corriente en chorro troposférica es sensible a los cambios en los vientos estratosféricos y que el enfriamiento de la estratosfera polar está asociado con un desplazamiento hacia los polos de la corriente en chorro troposférica.

Para el final del siglo XX, se tiene la certeza de que, durante el verano, la corriente en chorro en la troposfera se ha desplazado 2° de latitud hacia el polo. Esto genera alteraciones en el transporte de calor y humedad en la atmósfera, produciendo un calentamiento en la Península Antártica, La Patagonia y Nueva Zelanda, además poca humedad (sequía) en el oeste de Tasmania y Nueva Zelanda. También, afecta la temperatura y salinidad del Océano Austral. Después de varias simulaciones por modelos, que incluyen efectos antropogénicos como aerosoles, gases de efecto invernadero, cambios de ozono en distintas capas de la atmósfera y Sustancias Destructoras de Ozono (ODS) y factores naturales como erupciones volcánicas y ciclos solares. En primer lugar, los resultados muestran que, al menos durante los últimos 20 años, la recuperación del ozono ejerció una fuerza lo suficientemente fuerte sobre la circulación troposférica como para superar el efecto opuesto de los aumentos de gases de efecto invernadero.

Esta es una contribución crucial al debate de larga data sobre el papel relativo de estos dos factores en las tendencias de circulación pasadas y futuras. A medida que los niveles de ozono continúen recuperándose, su tasa de cambio y la influencia asociada sobre el clima se debilitarán, aumentando el papel relativo de los aumentos de los gases de efecto invernadero, especialmente en escenarios de 'solo negocios como hasta ahora' en los que no se hace nada para mitigar los efectos del efecto invernadero para el futuro. Por lo tanto, tales aumentos de emisiones podrían dominar los cambios futuros de la circulación troposférica y empujar la corriente en chorro hacia el polo. En segundo lugar, los hallazgos se suman a la evidencia de que los cambios estratosféricos pueden afectar el clima en la troposfera. Esto es importante porque, a pesar de décadas de investigación, el mecanismo exacto de estratosfera-troposfera es poco entendido. Por último, los resultados proporcionan una señal clara de que las acciones humanas pueden afectar el clima de la Tierra: el Protocolo de Montreal ha detenido el cambio climático asociado con el agotamiento del ozono. Esta es una lección práctica sobre cómo debe reaccionar la comunidad internacional a los desafíos ambientales globales. Restringir las emisiones peligrosas y cambiar las prácticas comerciales es también la forma de combatir el calentamiento global causado por los gases de efecto invernadero (Karpechko, 2020).

El objetivo del presente Boletín del Agujero de Ozono en la Antártida es monitorear la formación, evolución y finalización de la destrucción de ozono durante la primavera austral, a través de la evaluación de la Temperatura Estratosférica a nivel de 50 hPa y en latitudes polares, de 60° a 90° a 50 y 70 hPa, el análisis del área y volumen de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP), así como la estabilidad del vórtice. Se incluye el

análisis de observaciones satelitales y de superficie, la activación química del vórtice y el tamaño del Agujero de ozono. Finalmente, el impacto de la radiación ultravioleta en la Antártida y las conclusiones.

2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

2.1. Temperaturas.

Haciendo un análisis de la temperatura mínima en la estratosfera Antártica a 50 hPa., las temperaturas zonales en latitudes polares (60° a 90°) a 50 y 10 hPa, encontramos que la temperatura está por debajo de la media e inclusive por arriba del percentil de 10%, lo cual muestra una atmosfera muy fría hasta el momento y el pronóstico indica que los próximos 5 días, así continuará (***Figura 1***).

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/

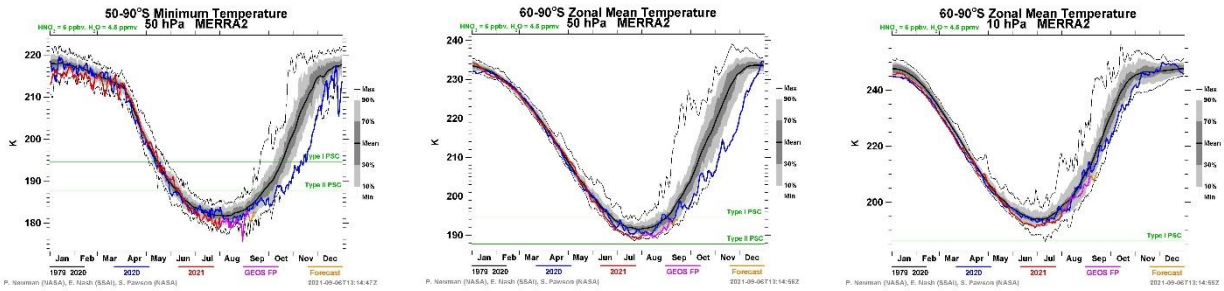


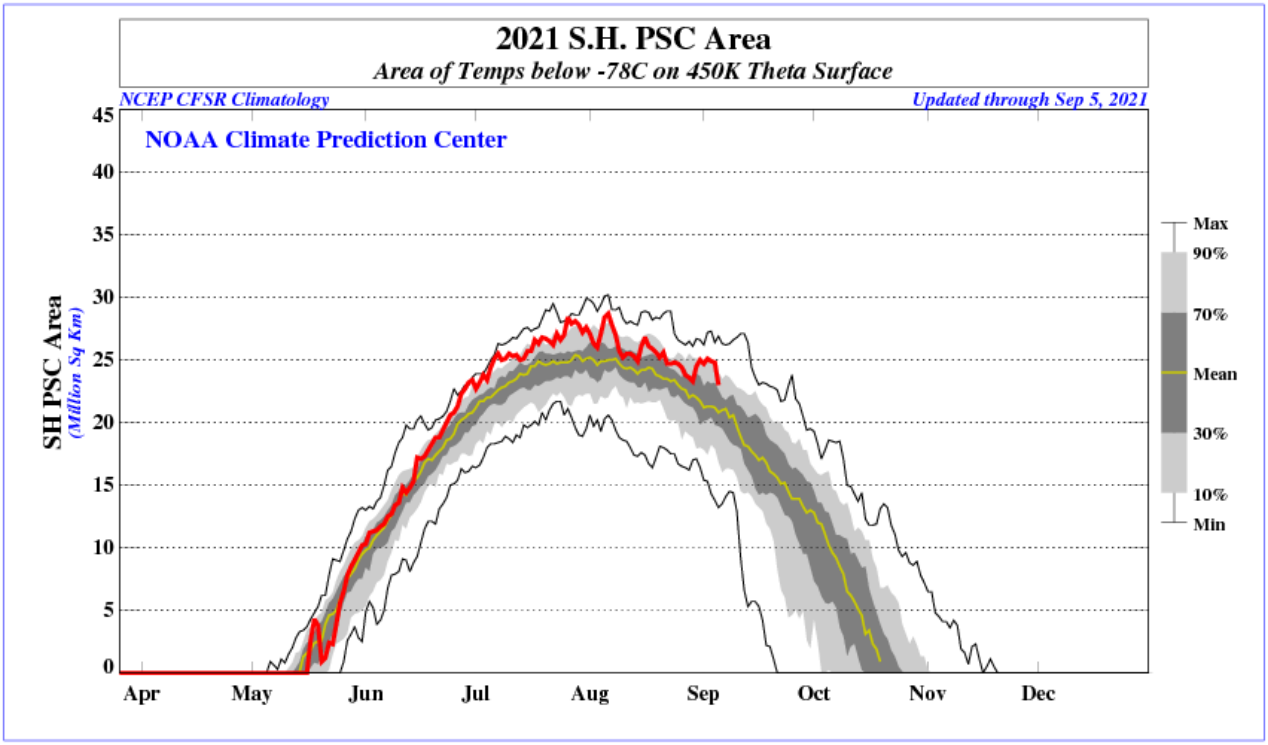
Figura 1. Izquierda: *Temperatura mínima promedio a 50hPa.* ***Centro:*** *Temperatura zonal a 50 hPa.* ***Derecha:*** *Temperatura zonal a 10 hPa. Las temperaturas zonales sobre la región de 50° a 90° S. La línea color rojo y morada, representa la evolución de las temperaturas para el año 2021 hasta el 5 de septiembre y proyectado al 10 de septiembre. La línea roja representa la media del periodo, 1979 a 2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos del mismo periodo. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada representan las nubes NEP tipo I 194,6 K (arriba) y NEP tipo II 187,8 (abajo)*

2.2 Área y Volumen de las NEP.

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman a través de las bajas temperaturas en la estratosfera; se considera Tipo I las que se forman a partir de una temperatura mínima inferior a 194,6 K (-78,5°C) y las Tipo II por debajo de los 187,7 K (-85,3°C). Los mecanismos de formación son a través de reacciones heterogéneas en la estratosfera.

En la Figura 2 se puede observar que el área de las NEP para este año y hasta el momento (6 de septiembre), un nivel superior al de la media y oscila en la curva del percentil de 90%. La formación de las NEP es acorde a la estratosfera fría y consecuentemente, seguirá en esos niveles, por lo menos los 5 días pronosticados por las temperaturas.

Fuente de datos: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml



Figuras 2. *Área de las nubes estratosféricas polares (NEP), sobre la región Antártica. La serie de tiempo donde las temperaturas están suficientemente bajas para para la formación de las NEP Tipo I (ácido nítrico, trihidratado, -78,5°C) en el nivel isentrópico de 460 K. La línea color roja, representa la evolución del tamaño de las NEP para el año 2021 hasta el día 1 de septiembre. La línea negra representa la media 9, la línea azul fuerte la media de 1979 a 2019. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.*

Nubes Estratosféricas Polares (NEP). Fotos: **Sr. Diego Bordón**, Pabellón Científico de la Estación Antártica Marambio, SMN 2020.

2.3 ESTABILIDAD DEL VÓRTICE

El flujo de calor promediado longitudinalmente entre los 45°S y los 75°S es una indicación de hasta qué grado está perturbada la estratosfera. En la **Figura 3** se muestra el desarrollo del flujo de calor. Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico.

Se puede observar en la **Figura 3** que poco flujo las dos últimas semanas de agosto, por arriba de su media. Pero al inicio de septiembre, el movimiento de ondas en la atmósfera del hemisferio sur aumenta, y alcanza su media histórica.

Fuente de datos: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml

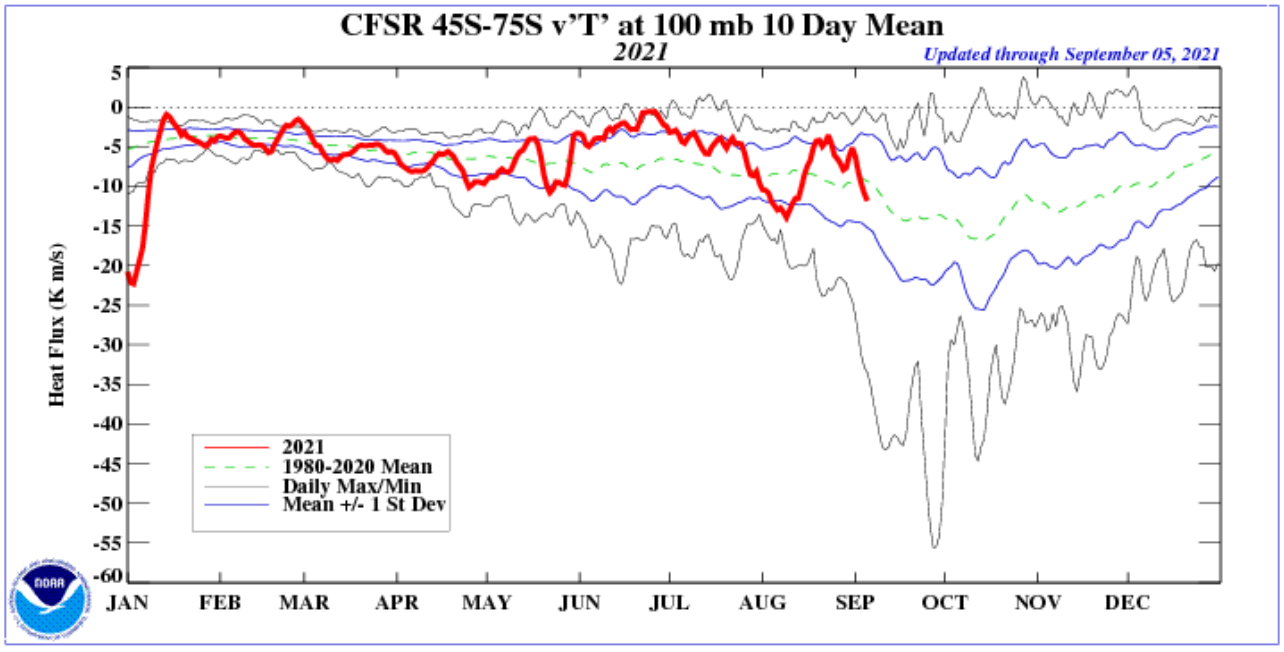


Figura 3. *Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2021 (actualizado hasta el 1 de septiembre. Note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño o calma La línea punteada verde es la media de 1980 a 2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el mismo periodo. Las líneas en azul es la media más o menos una desviación estándar.*

En la ***Figura 4*** se observa el vórtice polar y su estabilidad, a través del Potencial de Vorticidad (PV), en una superficie isoentrópica de Temperatura Potencial a 485K, correspondiente a la baja estratosfera donde la destrucción de ozono se lleva a cabo. Los valores entre más negativos, implican mayor estabilidad del vórtice polar. Y para inicios de septiembre, ya se observa un vórtice estable, con los días 7 y 8 de septiembre, centrados en el continente Antártico, mientras que los días 9 y 10 una leve deformación que eventualmente podría pasar por el sur de la Patagonia.

Fuente de datos:

http://www.copernicus.stratosphere.eu/4_NRT_products/5_Browse_plots/4_Meteo_fields/hres_pv_t.php?src=ECMWF_OD&spc=pv&l=at-485K&date=202106280000&ptype=sh

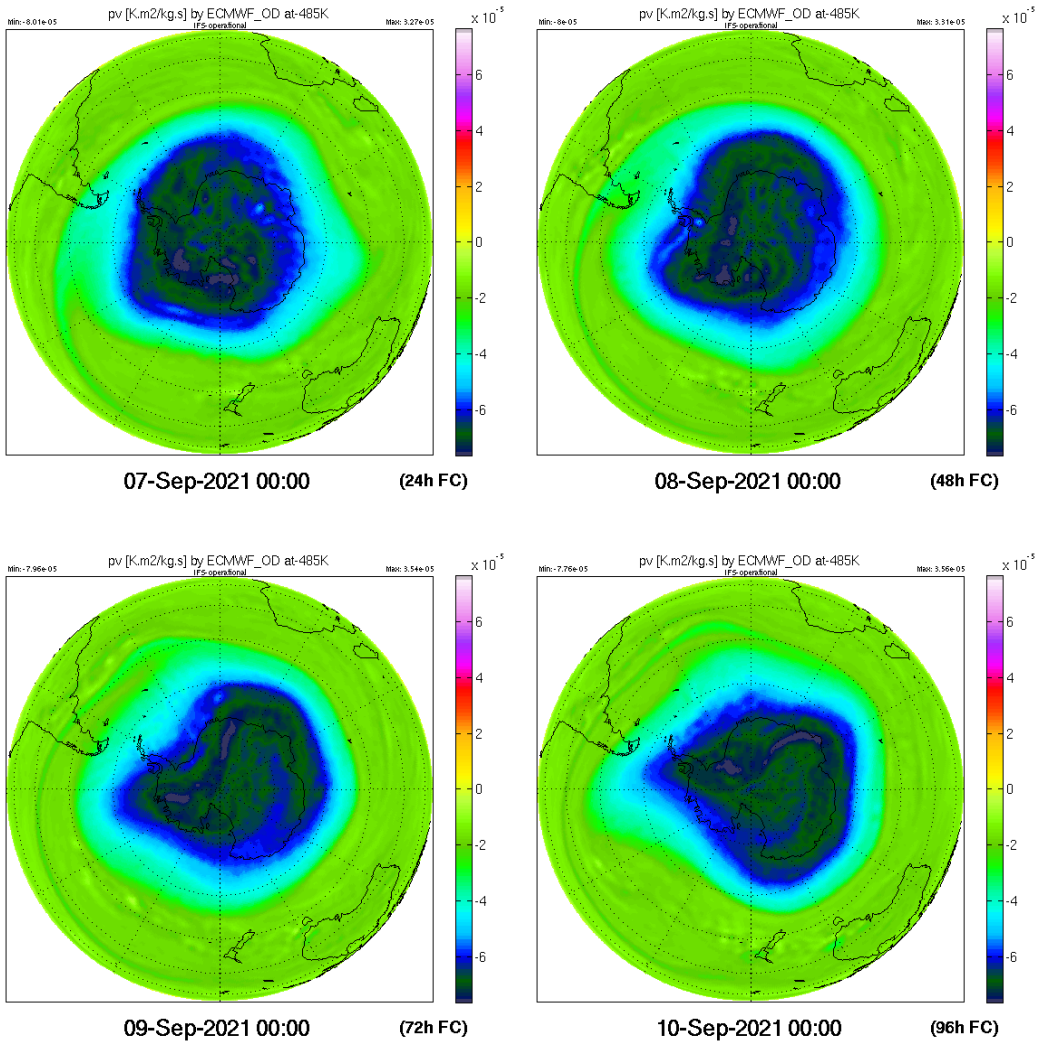


Figura 4. Mapas de proyecciones para la Vorticidad Potencial (PV) a una altura isentrópica de 485 K. Para los días 7, 8, 9y 10 de septiembre del 2021.

3. OBSERVACIONES DE OZONO

3.1 Observaciones Satelitales

Al inicio de la primavera austral, el sol empieza a retornar a la Antártida, ya que finaliza la noche. Tanto los datos satelitales, los datos de superficie y sondeos con globos muestran que el agujero de ozono, ya inició su formación. A la fecha de hoy, ya se observa la destrucción de ozono en la estratosfera a través de los compuestos destructores de ozono (ODS) albergados en las NEP.

La **Figura 5** se muestra la columna de ozono mínimo del 2021, tal como han sido medidas por el instrumento GOME-2 a bordo del MetOp en comparación con su media histórica 1979 a 2020.

Tal como se observó anteriormente, un vórtice estable, con una estratosfera fría y en calma, es decir con muy poco flujo de calor, producen NEP por arriba de la media y muy cercano a los máximos, generan los ingredientes propicios para una mayor destrucción de ozono, por debajo de la media, muy cercana al percentil de 10%, lo que indica una que hasta el momento un agujero muy parecido al del año 2020 (Figura 5).

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SH.html

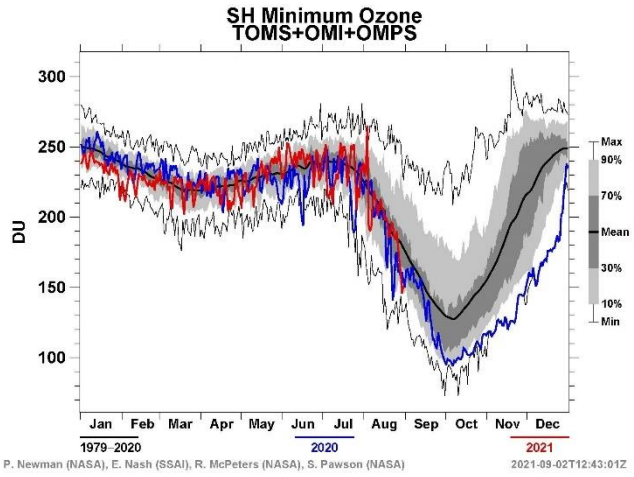


Figura 5. Mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur, observado por GOME-2, y en el pasado por SCIAMACHY. Los datos son hasta el 29 de agosto. La línea roja muestra las observaciones de GOME-2 para el año 2021, la línea azul representa al año 2020. La línea negra es la media del periodo 1979 a 2020.

3.2 Observaciones en superficie

Por ahora, solo se usan, mediciones en superficie obtenidos mediante el Espectrofotómetro Dobson y ozonosondeos de la Estación GAW Ushuaia (54° 50’ 54.46’’S, 68° 18’ 37.52’’ O) Y mediciones con Espectrofotómetro Dobson de la Estación Antártica Marambio (61° 14’ 33.68’’ S, 56° 37’ 36.98’’ O), dependientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Ozonosondeos y mediciones del espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica Belgrano II (77°52’28”S 34°37’37”O), medidas con Espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica San Martín (68°07’48’’ S, 67°06’ o8’’ O), ambos laboratorios bajo la dependencia de la Dirección Nacional del Antártico/Instituto Antártico Argentino (DNA/IAA).

3.2.1. Estación VAG Ushuaia.

La Estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de Ushuaia forma parte de la red de medición de parámetros físicos y químicos de la atmósfera de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La estación VAG de Ushuaia se localiza al borde del Vórtice Polar, de tal manera que, durante la temporada de agujero de ozono, éste puede pasar por arriba de la ciudad de Ushuaia e incluso adentrarse hacia el norte de la Provincia de Tierra del Fuego.

El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 7**, se muestra la evolución diaria de la columna total de ozono y las medias mensuales para el año en curso, comparado con su media histórica (1994-2020). Los datos diarios oscilan como todos los años, con gran amplitud y alrededor de la media, pero no rebasan los máximos o mínimos. De la misma manera los datos mensuales, aun el agujero de ozono está en crecimiento y no pasa por el sur de Sudamérica.

En la Figura 8 se muestra los primeros 2 perfiles de ozono y de temperatura, producidos por los ozonosondeos realizados el 11 y 25 de agosto. Se puede observar que aun en esa esa zona todavía no se detecta destrucción de ozono, debido a que el agujero de ozono está en pleno crecimiento.

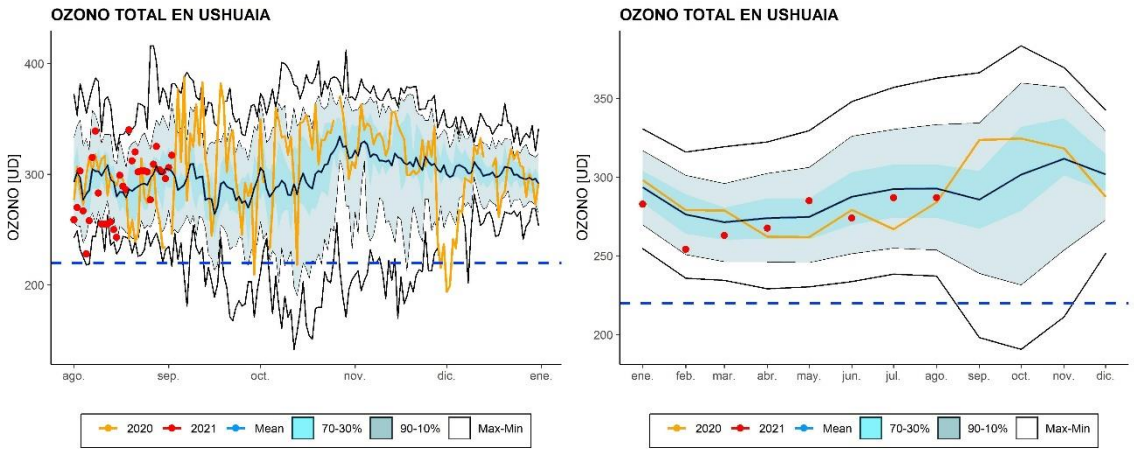


Figura 7*. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. En ambos gráficos los puntos rojos son los datos del año 2021. La línea naranja corresponde al año 2020, la línea negra la media del período 1994 a 2020.*

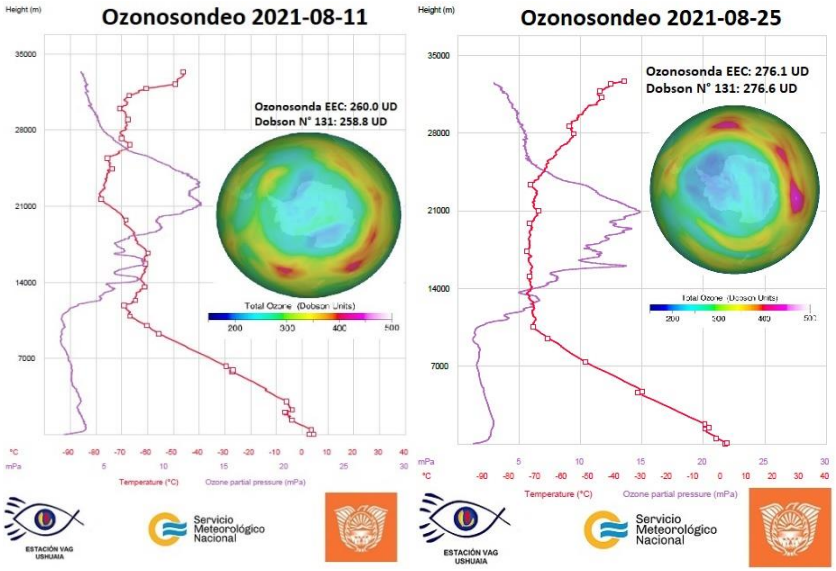


Figura 8. *Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea morada es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].*

3.2.1 Estación Antártica MARAMBIO.

La estación Antártica Marambio se encuentra en la península Antártica y forma parte de la red de medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El ozono total se mide con espectrofotómetro Dobson, pero sus datos aún no están disponibles.

En convenio entre el SMN y el Instituto Finlandés de Meteorología (IFM) se mantiene el programa de ozonosondeos. Dichos sondeos se efectúan aproximadamente dos veces por semana durante el período de Agujero de Ozono. Pero aún no están disponibles.

El espectrofotómetro Dobson *(#D099*) mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a septiembre) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, caída de Nieve, etc. Este año inicia tarde las mediciones debido a las inclemencias del tiempo, pero actualmente ya están regularizadas dichas mediciones.

3.3.3. Estación Antártica San Martín.

La estación Antártica San Martín se encuentra en la península Antártica San Martín (68°07'48'' S, 67°06' 8'' O) y forma parte de la red de medición de ozono total del programa VAG de la OMM. El instrumento Brewer #162 utilizado para medir el ozono total en la estación y a partir del 1 de diciembre de 2020, sus datos serán parte de la red europea de instrumentos Brewer **EUBREWNET**. El Espectrofotómetro Brewer se encuentra bajo un convenio entre el **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el ex **Comando Antártico de Ejército**.

El espectrofotómetro Brewer mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a septiembre) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, etc. Ozono, pero actualmente se estarán regularizadas las mediciones.

Test de lámpara y mantenimiento diario del espectrofotómetro Brewer de Base San Martín por el personal técnico del IAA Ezequiel Peschiera y Nahuel Solís Etchegoin (2020).

3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.

La estación Antártica Belgrano II se encuentra ubicada en el Nunatak Bertrab ubicado al sur del mar de Wedell en la Bahía Vahsel sobre la Costa Confin en la Tierra de Coats y forma parte de la red de medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El ozono total se mide con espectrofotómetro Brewer MKIV desde 1992, Los datos del Brewer #99 desde el año 2020 son parte de la red europea de brewer **EUBREWNET**. El Espectrofotómetro Brewer es un instrumento que deriva del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el **Programma Nazionale di Ricerche in Antartide** (PNRA) de Italia a través del Instituto de Física Atmosférica de Roma (IFAR).

Los ozonosondeos que se realizan en esta base son realizados a través del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA) de España desde 1994, donde se inicia la colaboración con el monitoreo de la capa de ozono y el NO2 con el

Espectrómetro Visible de Absorción (EVA), utilizando la técnica DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Hoy se trabaja con espectrómetros que utilizan la técnica Max DOAS y un LIDAR para la detección de las NEP.

Belgrano salió de la noche polar a mediados de agosto y los instrumentos como el Brewer, no pueden operar por tener aún un ángulo solar muy alto. Por eso, al igual que Marambio y San Martin, se espera que el programa de medición inicie, según las condiciones meteorológicas lo permitan. En la figura 9 se observan los cuatro ozonosondeos que se han realizado hasta el monto, donde se observa que aún no se observa la destrucción de ozono.

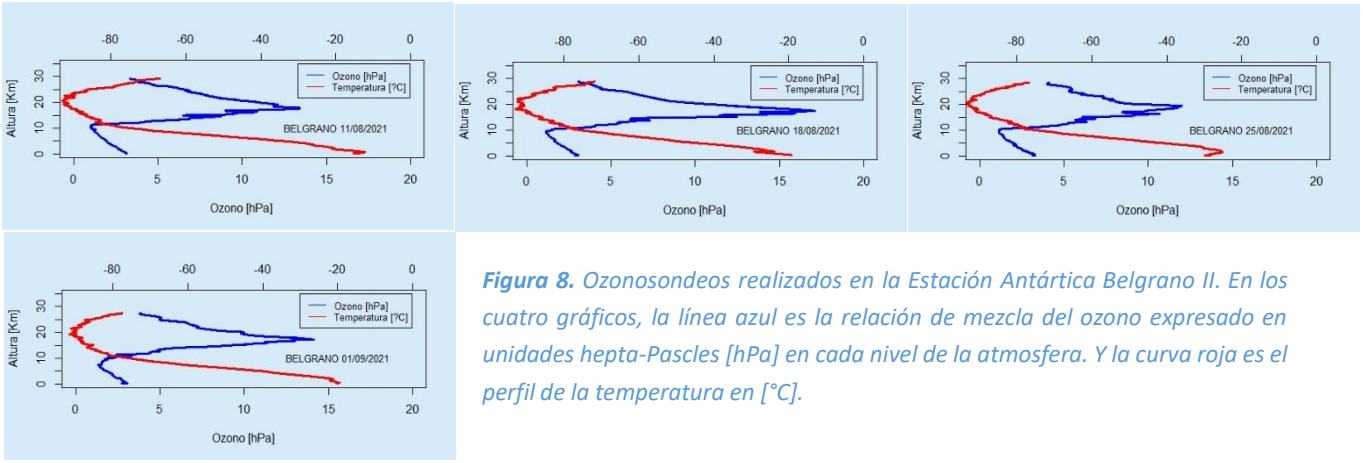
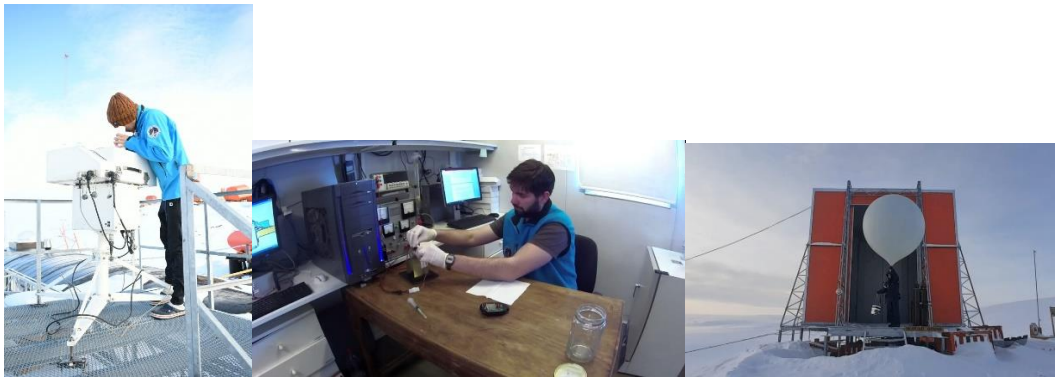


Figura 8. *Ozonosondeos realizados en la Estación Antártica Belgrano II. En los cuatro gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades hepta-Pascles [hPa] en cada nivel de la atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].*



Operación de Espectrofotómetro Brewer, preparación y lanzamiento de ozonosonda en Base Belgrano II por los Técnicos del IAA, Guillermo Maidana, Ezequiel Molina y Pablo Signorelli (2020).

4. ACTIVACIÓN QUÍMICA DEL VÓRTICE

4.1 Resultados del Modelo BASCOE.

La **Figura 9** muestra la progresión de las tres especies principales, que son reservorios dentro de las NEP, para la destrucción de ozono en la estratosfera y de la concentración de ozono con unidades [ppb]. Los mapas son en el nivel de 50 hPa.

En la primera fila; el ácido nítrico (HNO_3) se observa cómo es removido gradualmente, cuando las temperaturas NEP están bien asentadas debido al invierno, pero se observa que la remoción del HNO_3 inicia a partir del mes de junio y continua hasta inicios de septiembre. La remoción de HNO_3 gaseoso es una indicación de que este compuesto se condensa en la forma de nubes estratosféricas polares (ácido nítrico trihidratado, $HNO_3 \cdot 3H_2O$).

En la segunda fila, el ácido clorhídrico (HCl) es removido, dado que reacciona con nitrato de cloro ($ClONO_2$) y forma cloro activo (Cl_2). Se puede apreciar como el ácido clorhídrico está siendo vaciado puesto que es convertido en partículas NEP. La conversión extensa del HCl ya ha tenido lugar a partir del 1 de julio hasta inicios de septiembre.

En la tercera fila; monóxido de cloro (ClO) es un buen indicador de la activación del vórtice. Sin embargo, se debe observar que el ClO se dimerisa y forma $(ClO)_2$. El dímero es fácilmente separado en la presencia de luz solar y el ClO estará presente en aquellos lugares donde el vórtice sea iluminado por el sol, mientras que las áreas oscuras serán continuaran con $(ClO)_2$, el cual no es observado por el satélite Aura-MLS, pero es calculado y asimilado por el modelo BASCOE. Observando la suma del monómero y dímero (ClOx) se puede obtener una mejor impresión del grado de activación del cloro. Los primeros signos de activación son ya visibles el 1 de junio. El grado máximo de activación tiene lugar durante del mes de agosto. Para el 17 de septiembre el grado de activación está menguando y el 5 de octubre no queda ya casi cloro activo.

En la cuarta fila, muestra la razón de mezcla del ozono (O_3) Donde se observa que a inicios del mes de septiembre ya inicio el proceso destrucción de ozono y se forma poco a poco el denominado agujero de ozono, y se observa en el anillo circundante, el exceso de ozono que se acumula y que el vórtice no permite que ingrese al interior.

Fuente de datos: http://www.copernicus-stratosphere.eu/

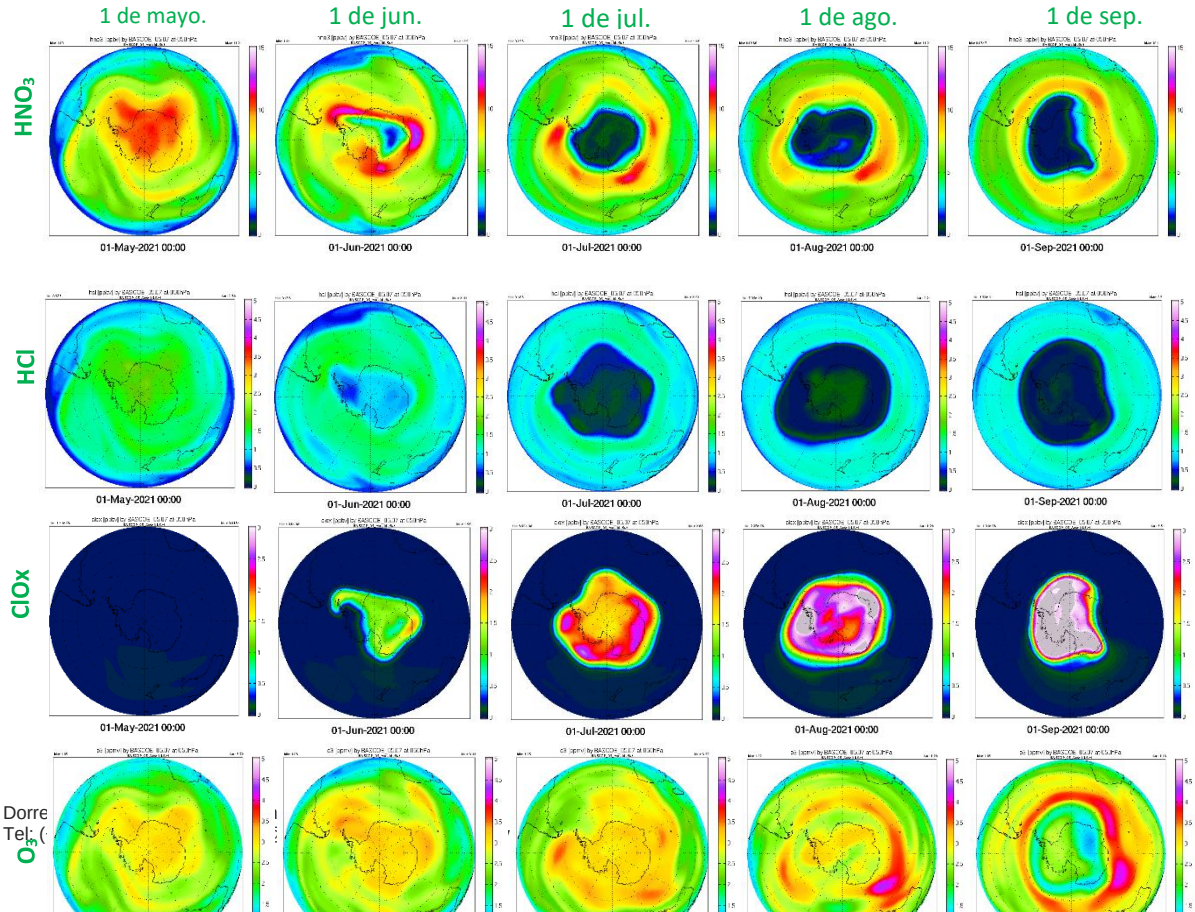


Figura 9. Resultados del modelo de asimilación BASCOE a 50 hPa. Este modelo se usa como parte del proyecto macc-II, ahora el NRT Análisis de ozono y especies relacionadas con el ozono. La primera fila muestra la relación de mezcla del ácido nítrico (HNO_3). La segunda fila muestra la relación de mezcla para el ácido clorhídrico (HCl). La tercera fila muestra la relación de mezcla para el óxido de cloro y su dímero ($ClOx = ClO + (ClO)_2$). La última fila (abajo) muestra la relación de mezcla del ozono.

5. El Agujero de ozono

5.1 El área del agujero de ozono

En la **Figura 10** se muestra el área de la región en la que el ozono total es menor a las 220 UD (Definido por la comunidad científica como Agujero de Ozono). Actualmente hasta el día 4 de septiembre, el agujero tiene un área de 19.4 millones de Km^2, comparado con la media del periodo 1979 al 2020 de 14,8 millones de Km^2. La diferencia es 4,6 millones de Km^2. La tendencia del crecimiento hasta ahora, es muy similar al año 2020, pero las proyecciones a 5 días, marcan que su crecimiento sea muy similar al de 2018, es decir una desaceleración en su crecimiento. Un comparativo muestra que el actual de agujero de ozono, ya es mayor al Rusia entero (17,1 millones de Km^2).

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SH.html y https://www.temis.nl/index.php

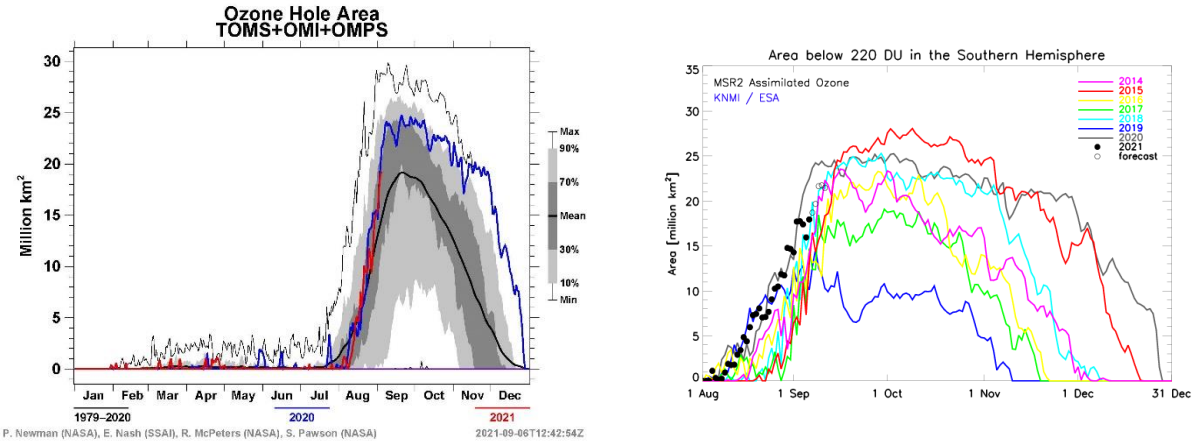


Figura 10. Área (millones de km^2) donde la columna total de ozono es menos de 220 unidades Dobson, hasta el 4 de septiembre. Izquierda; Satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). Derecha, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea).

En la figura 11, se observa de manera global, el crecimiento del agujero de ozono durante los próximos 5 días (8 de septiembre al 9 de septiembre).

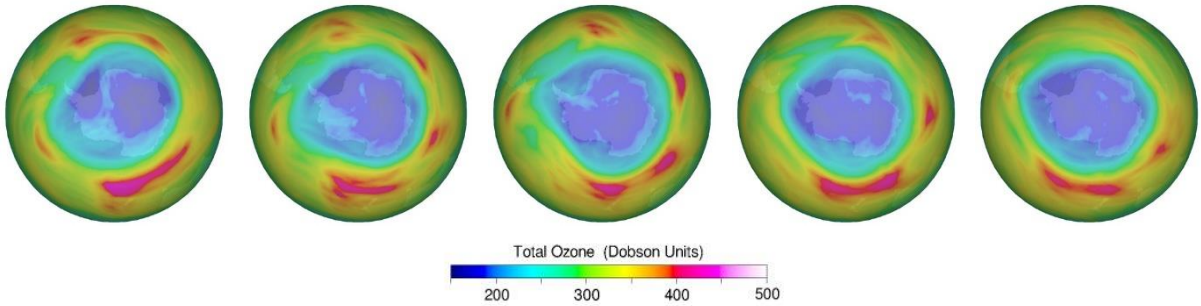


Figura 11. Proyecciones para los próximos 5 días que muestran la evolución y crecimiento dl agujero de ozono.

Animación de la evolución del agujero de ozono, sede 1 de Julio hasta a fecha: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/ozone_maps/movies/OZONE_D2021-07-01%25P1D_G%5e1280X720.IOMPS_PNPP_V21_MMERRA2_LSH.mp4

6. CONCLUSION

La destrucción de ozono en la estratosfera antártica ya ha comenzado. Las condiciones meteorológicas de la estratosfera y el vórtice, ponen las condiciones físicas para su desarrollo, modulando su crecimiento, mientras que las condiciones químicas, a través de las NEP, inician con la destrucción del ozono total, para formar el agujero de ozono antártico.

Las temperaturas mínimas muestran un enfriamiento en la estratosfera antártica, por debajo de la media y por debajo del percentil de 10%, aun las proyecciones muestran la misma tendencia. Las NEP se han formado y se encuentran por arriba de la media histórica de tal manera que se ha iniciado la activación química del agujero de ozono, es decir especies de cloro han iniciado las reacciones catalíticas de destrucción de ozono. Las observaciones en superficie están empezando a medir, de tal manera que aún no se tienen datos. El agujero de ozono se encuentra ya formado y creciendo, hasta el 4 de septiembre tiene una superficie de 19,4 millones de km^2, 4,6 millones de km^2 más grande que su media y que su tamaño ya cubre en su totalidad al país más grande del mundo, que es Rusia con 17,1 millón de km^2.

Es muy temprano para proyectar como será y evolucionará el agujero de ozono para este 2021.

El informe final se actualizará aproximadamente, antes del día 31 de septiembre 2021.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Oficina de Asimilación y Modelo Global (GMAO) de la NASA (MERRA).

Se agradece al Centro Europeo para Pronósticos del Tiempo de Medio Alcance (ECMWF), Instituto Noruego para

Investigación del Aire (NILU) y a la Agencia Espacial Europea (ESA).

Se agradece a Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

Se agradece a Centro Climático de TOKIO, considerado Centro regional de Clima (RII, Asía).

Se agradece los datos de las ozonosondas de Belgrano II del convenio entre el instituto Antártico Argentino (IAA) dependencia de la Dirección Nacional del Antártico de Argentina (DNA) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) de España.

Se agradece al Instituto Finlandés de Meteorología, por el soporte de las ozonosondas en la Estación Antártica Marambio (Convenio con el SMN).

Se agradece al **Prof. Juan Daniel Agüero y Osvaldo Blanco**, por el aporte y control de los datos históricos de la Estación Antártica Marambio.

Se agradece al personal de la Estación VAG-Ushuaia; **Ing. Lino Fabián Condori, Sr. Emiliano Petruzzi y Sr. Gonzalo Gambarte.**

Se agradece a los observadores Antárticos del Pabellón Científico de Marambio; **Sr. Pedro Díaz y Diego Bordón.**

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Ing. Rodrigo Azpilcueta y al Ing. Alvaro Martín Errasquin.**

Se agradece a los observadores Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Ing. Heraldo Ivan Vilca, Téc. Sebastian Firpo y al Téc. Santiago Kyanka.**

8. BIBLIOGRAFÍA

- Banerjee, A., Fyfe, J. C., Polvani L. M., Waugh, D., And Chang K. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol, Nature, Vol 579, 544-548.
-
- Geir Braathen, “Boletín de Ozono Antártico”, Editado por la WMO.
- Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.
- Veefkind, J.P., J.F. de Haan, E.J. Brinksma, M. Kroon and P.F. Levelt, Total Ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) Using the DOAS technique, IEEE Trans. Geo. Rem. Sens., 2006, Vol. 44, No. 5, 1239-1244, doi:10.1109/TGRS.2006.871204.
- H. J. Eskes, R. J. van der A, E. J. Brinksma, J. P. Veefkind, J. F. de Haan, and P. J. M. Valks, Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat, Atmos. Chem. Phys. Discuss, 5, 4429-4475, 2005.
- Valks, P.J.M., J.F. de Haan, J.P. Veefkind, R.F. van Oss and D.S. Balis, TOGOMI: An improved total ozone retrieval algorithm for GOME, XX Quadrennial Ozone Symposium, 1/6/2004-8/6/2004, C.S. Zerefos (Ed), 2004, Athens, University of Athens, 129-130.
- E. Botek, S. Chabrillat, Y. Christophe (BIRA-IASB) “Report on 2014 Antarctic ozone hole studies” MACC-III project (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - III) 2014.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018 – Exective Sumary – WMO UNO environment, NOAA,

NASA, European Comission.

- Manuel Gil Ojeda “El ozono estratosférico” Tethys, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 e Informe Final del Agujero de Ozono 2019.
- Karpechko, A., Y. (2020). Jet stream stops shifting as ozone layer recovers, Nature, Vol 579, 544-501.
- Solomon, S. (2019). The discovery of the Antarctic ozone hole, Nature, Vol 575, 46-47.
-
- Carabajal Benitez Gerardo; Cupeiro Manuel; Sánchez Ricardo; Agüero Juan Daniel; Barlasina María Elena y Nollas Fernando. Caracterización de la Columna Total de Ozono medido con el Espectrofotómetro Dobson en cuatro estaciones en la Argentina. ISBN 978-987-1323-36-4